doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2023.06.001

环红矮星行星系统的观测和理论研究概述*

潘梦睿† 刘倍贝‡

(浙江大学物理学院天文研究所 杭州 310027)

摘要 红矮星是质量最小, 光度最低的一类主序恒星. 随着探测技术的提升, 在其周围探测到了丰富的行星种群, 与其他类型恒星周围的行星具有不同的分布特征. 在红矮星周围, 类地行星具有较高的出现率, 由其构成的行星系统构型十分紧凑. 宜居带的范围更靠近主星, 更有利于搜寻宜居行星. 超级地球和亚海王星之间过渡半径的分布特征也与类太阳恒星存在差异. 巨行星在小质量恒星周围的发现更是对理论模型提出了巨大挑战. 原行星盘中固体物质的质量随主星质量迅速衰减, 是否能够解释巨行星的起源仍然是未解之谜. 得益于TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite), James Webb和ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)等望远镜的观测, 为行星形成研究提供了新的认知和契机. 将回顾红矮星周围不同行星种群的观测, 并总结对于红矮星周围行星形成理论的最新认知.

关键词 行星和卫星: 形成, 行星和卫星: 类地行星, 行星和卫星: 气态行星, 恒星: 小质量

中图分类号: P142; **文献标识码**: A

1 引言

2019年诺贝尔物理学奖授予天体物理学领域的突破性贡献, 其中之一颁发给1995年发现第1颗围绕类太阳型恒星周围系外行星的探测团队[1]. 系外行星的发现具有重大的里程碑意义, 自此人类对于行星系统的研究不再局限于仅有的太阳系. 随后二十多年里, 这一领域迅猛发展, 探测到的行星数目不断增加, 其中围绕类太阳型主星运动的行星占大多数.

红矮星是主序星中质量最小、温度最低的恒星, 具有与太阳迥异的恒星活动和光谱类型[2], 为行星的生长和演化提供了不同的外部环境. 1998年, Marcy等[3]通过视向速度法首次在距离地球4.7 pc的红矮星Gliese 876 (0.32 $M_\odot$)周围观测到了一颗轨道周期仅61 d的温暖巨行星, 开启了在红矮星周围开展行星探测和研究的新征程. 目前对红矮星并没有严格的定义, 不同研究选择了不同的定义, 多数指M型矮星, 偶尔也包括晚型K型矮星或质量< 0.3 $M_\odot$的中晚型M矮星. 本文将主要讨论质量介于0.08–0.3 $M_\odot$的中晚型M型矮星, 并在特定问题下赘述适用范围.

随着学界对类太阳主星周围行星认识的日趋完善, 近年国际热点逐渐向围绕红矮星运转的行星转变. 原因有以下几个方面: 第一, 红矮星是银河系中数量最多的恒星类型[4–6]. 研究表明该类主星周围出现行星的概率高于类太阳FGK型主星[7–8]. 因此, 这类星体占据了实际行星种群的大多数, 探测和研究该类恒星系统周围的行

2023-04-17收到原稿, 2023-07-03收到修改稿

*国家自然科学基金项目(12222303、12173035、12111530175、12147103), 浙江大学百人计划启动基金和中央高校基本科研业务费专项资金资助(2022-KYY-506107-0001、226-2022-0021)

†panmr@zju.edu.cn

‡bbliu@zju.edu.cn

星特性具有普适意义. 第二, 目前大样本行星探测的主要手法是掩星法, 其探测精度与行星和主星半径比呈正相关. 红矮星半径远小于太阳, 因此这类天体更适合类地行星观测. 第三, 探测系外行星的热点之一是寻找宜居带上的行星(与主星距离适中, 地表温度适宜液态水的存在). 对于类太阳型主星, 只有美国Kepler空间望远镜有能力探测潜在类太阳型主星下的宜居行星. 这一科学目标在Kepler退役后较长一段时间内难以企及. 然而红矮星光度较低, 宜居带处于10–30 d轨道周期范围, 非常适合包括地基望远镜的长时间监测. 一经发现这类天体, James Webb空间望远镜也可以开展相关大气谱线的后续观测, 进一步确认是否具有生命特征[9–10]. 综合以上, 非常多的国际项目定位于寻找红矮星周围的行星系统, 例如美国航空航天局的TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite)空间望远镜[11–12]、哈佛-史密松天体物理学中心的MEarth (search for transiting habitable super-Earths around nearby M dwarfs)项目[13–14]、比利时列日大学和瑞士日内瓦天文台的TRAPPIST (TRAnsiting Planets and PlanetesImals Small Telescope)项目[15]、欧洲南方天文台的SPECULOOS (Search for Planets EClipsing ULtra-cOOl Stars)地面掩星观测项目[16]、美国EDEN (ExoEarth Discovery and Exploration Network)地面掩星观测项目[17]、日本Subaru望远镜红外视向速度观测[18]以及德国、西班牙联合开展的CARMENES (Calar Alto high-Resolution search for M dwarfs with Exoearths with Near-infrared and optical échelle Spectrographs)近红外光视向速度观测[19]等.

目前已观测到约150颗环绕红矮星(0.08–0.3 $M_\odot$)运行的行星, 其中大部分是类地行星(0.5–2倍地球质量($M_\oplus$), 0.5–1.25倍地球半径($R_\oplus$))和超级地球(2–10 $M_\oplus$, 1.25–2 $R_\oplus$). 类海王星(10–30 $M_\oplus$, 2–4 $R_\oplus$)和气态巨行星($>30\,M_\oplus$或$\geqslant 0.1\,M_{\rm J}$ (木星质量), $>4\,R_\oplus$)分别占约10%和26.7%. 与类太阳恒星周围的行星相比, 红矮星周围类地行星的出现率更高[20], 并且它们的轨道周期都很短, 大部分距离主星0.01–0.1 au[21], 图1展示了红矮星周围行星的轨道半长径和质量分布, 图中圆点大小表示行星半径, 颜色代表恒星的质量, 亮绿色加号表示该行星位于恒星宜居带内. 行星质量大于0.1 $M_{\rm J}$ (图中虚线位置)的气态巨行星, 大多在1 au附近聚集, 普遍比类地行星轨道半长径大1–2个数量级. 红矮星周围出现热木星的概率远低于类太阳主星[22–23], 预示着红矮星周围巨行星的形成率较低, 或气态行星的形成位置距离恒星较远, 且未在气体盘耗散前大规模向内迁移. 另一方面, 在红矮星质量范围内, 巨行星的质量和轨道位置与主星质量之间并没有明显相关性(图1).

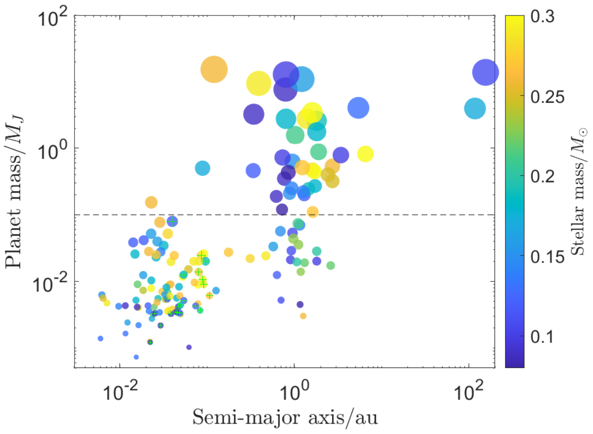

图 1　红矮星周围行星质量或质量下限与轨道半长径分布图. 图中虚线表示行星质量为0.1 $M_{\rm J}$. 圆点大小和颜色棒分别代表行星半径和恒星质量. 带有亮绿色加号的行星位于宜居带内. 小质量行星大多距离主星0.01–0.1 au, 气态行星在距离恒星1 au附近聚集. 数据来源于https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu.

Fig. 1　Distribution diagram of planet mass or lower limit mass as a function of semi-major axis around M dwarf stars. The dashed line indicates that the planet mass is 0.1 $M_{\rm J}$. The size and color bar represent the planetary radius and stellar mass, respectively. The light green plus symbols indicate habitable planets. Most of the small planets are 0.01–0.1 au from their host stars, and giant planets accumulate near 1 au. Data adopted from https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu.

图2展示了目前红矮星周围观测到的多行星系统, 其中大部分由类地行星构成, 轨道结构分布非常紧密, 相邻行星周期比在2:1、3:2和5:3等共振附近存在峰值[24–27], 这些共振结构也可在行星质量增长或损失[28]、气体盘耗散[29]以及外侧巨行星扰

动[30]等作用下被破坏, 形成非共振系统构型. 由巨行星构成的行星系统结构则相对疏松[21, 31]. 除了KMT-2020-BLG-0414L[32]这一个行星系统由一颗巨行星和一颗类地行星构成以外, 其余行星系统均由相似大小的行星构成. 各类行星和行星系统在统计上的分布特征[33]以及与其他类型恒星周围行星分布的差异性, 使红矮星周围行星系统的形成成为理论研究中的一个重要课题, 而这类小质量恒星周围巨行星的形成则是当前学界的一大难题.

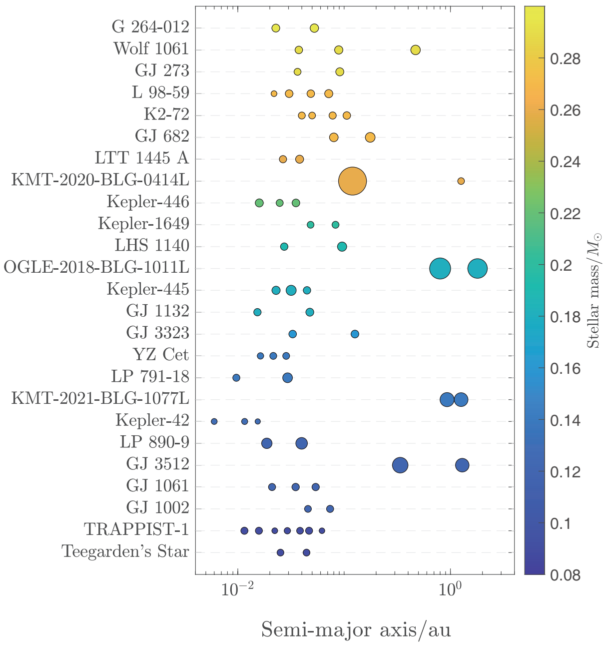

图 2 环红矮星多行星系统分布图. 点大小和颜色的含义与图1一致. 大部分系统由相似大小的行星构成, 系统构型非常紧密. 数据来源于https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu.

Fig. 2 Architectures of multi-planetary systems around M dwarfs. The color and symbols have the same meanings as Fig. 1. Most systems are tightly compacted and consist of planets in similar size. Data adopted from https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu.

根据形成原理的不同, 当前行星形成理论可分为核吸积模型和引力不稳定模型. 图3展示了行星在这两类不同模型中的演化过程[34]. 在核吸积模型中, 行星的形成开始于亚微米级大小的尘埃, 尘埃受到重力作用向原行星盘中心平面沉降, 并在电磁力的作用下相互凝结生长成厘米至米级大小的卵石(pebble). 一类主流观点认为, 这类卵石在局部聚集可诱发冲流不稳定性(streaming instability), 形成千米量级的星子. 这些星子可通过吸积卵石或者相互碰撞等方式生长, 最后吸积气体形成类地行星、类海王星或气态巨行星[35]. 核吸积模型作为主流的行星形成理论, 广泛用于解释各类行星的形成. 另一方面, 引力不稳定模型则认为在质量较大、温度较冷的原行星盘内, 当压力不足以抗衡自身引力时, 盘中气体可直接碎裂、坍缩形成巨行星[36–39](图3黄色箭头).

本文将简要概述红矮星周围行星的观测和理论现状. 根据行星质量分类, 从类地行星、类海王星和气态巨行星的3个方面展开介绍, 最后对该领域的未来趋势和发展作出总结与展望.

2 类地行星

2.1 类地行星观测

类地行星的质量和半径均与地球相似(M_p = 0.5–2 $M_\oplus$, R_p = 0.5–1.25 $R_\oplus$), 是主要由岩石构成的小质量行星. 与类太阳恒星相比, 红矮星周围的行星在凌星时引起的恒星光度变化更显著, 且宜居带更靠近恒星, 行星轨道周期更短, 更适合做深入细致观测刻画, 也更利于大气观测. 类地行星在红矮星周围具有更高的出现率[40]. 根据Kepler凌星观测, 平均每颗类太阳FGK恒星周围有0.15颗轨道周期0.8–50 d的类地行星(0.8–1.25 $R_\oplus$)[41]. 而在红矮星周围, 相似轨道周期范围内($<$50 d)出现地球大小行星(1–1.5 $R_\oplus$)的概率约是FGK恒星的3–4倍[7], 为0.56–0.61[20, 42]. 若将行星搜寻范围扩大至轨道周期小于100 d, 类地行星出现率将增加至0.65左右[20].

目前已有相关研究, 尝试解释类地行星在红矮星和类太阳恒星周围出现率和平均数的差异性, 及相应行星系统的观测特征[43–45]. 红矮星周围高类地行星形成率这一现象的解释机制大致总结为以下几点: (1)红矮星周围的原行星盘质量较小, 行星胚胎没有足够的物质吸积, 无法形成大质量行星核并在后续吸积气体形成气态巨行星[46–47]; (2)卵石吸积模型中的行星生长受到卵石孤立质量的限制, 行星胚胎可形成的最大固体质量与恒星质量

成正比, 对于环绕红矮星的行星而言孤立质量仅约1–3 $M_\oplus$, 不足以吸积气体形成大质量行星[35]; (3)在行星迁移理论中, 小质量恒星周围行星的I类迁移速度更快, 这也使得行星在形成过程中没有足够的时间吸积生长, 且行星最终迁移至较短周期的轨道上, 更有利于凌星观测[48]; (4)根据卵石吸积模型, 巨行星的形成可阻碍原行星盘中卵石的径向漂移, 抑制了类地行星或超级地球在原行星内盘的形成, 而大质量行星在类太阳恒星周围具有更高出现率, 造成了大质量恒星周围类地行星的缺失[49].

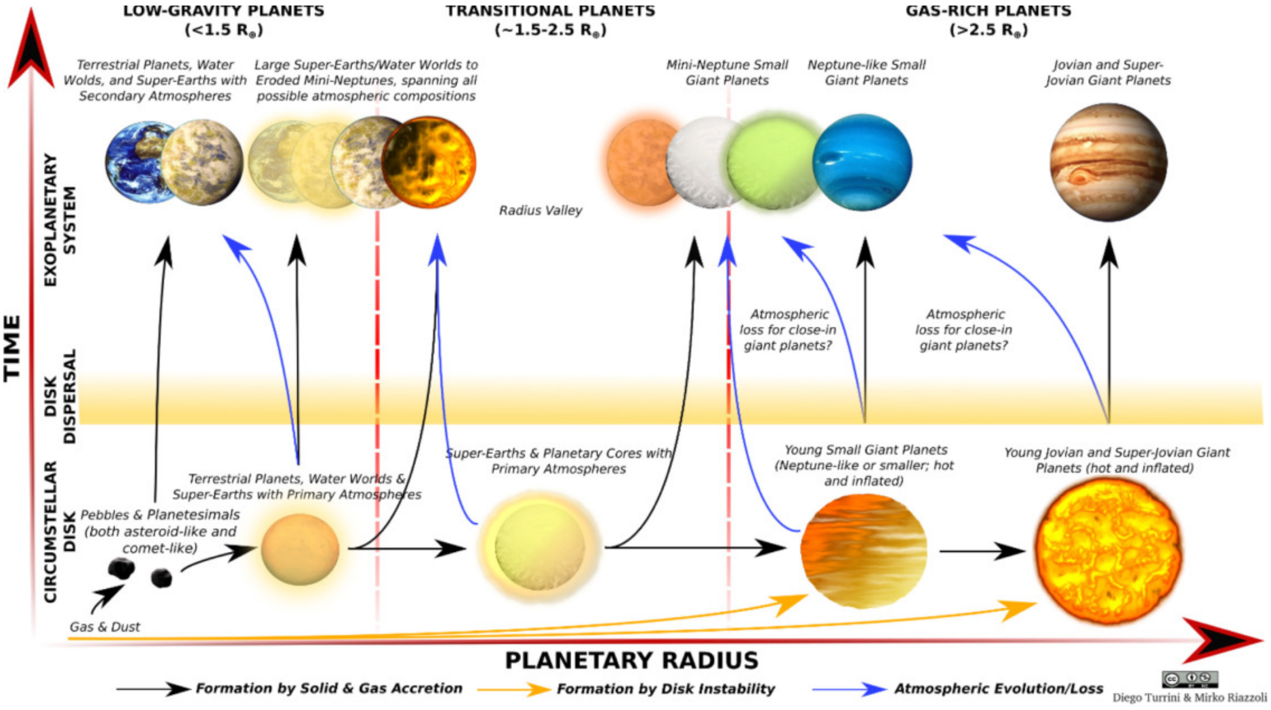

图 3 不同类型行星的形成路径示意图. 黑色和橘黄色箭头分别代表核吸积模型和引力不稳定模型的行星形成过程, 蓝色箭头表示行星大气演化过程. 图引自Turrini等[34].

Fig. 3 Schematic representation of the formation paths that create the different kinds of planets. The black and orange arrows indicate the paths linked to the core accretion and gravitational instability, respectively. The blue arrows represent the paths shaped by atmospheric evolution. Figure adopted from Ref.[34].

2.2 行星吸积模型

行星胚胎可通过吸积星子和卵石的方式生长, 称为星子吸积和卵石吸积. 其中星子吸积主要依赖于行星胚胎和星子之间的引力, 吸积过程包括快速的失控式生长(runaway growth)阶段和随后的寡头式生长(oligarchic growth)阶段[50–52]. Miguel等[43]采用星子吸积模型研究了行星在100 au原行星盘内的形成, 发现火星质量的行星仅在恒星质量$\geqslant 0.07\ M_\odot$且原行星盘质量$\geqslant 10^{-2}\ M_\odot$的情况下形成, 而地球大小行星的形成条件更为苛刻. 若恒星具有更高吸积率, 原行星盘内($\sim$ 15 au)物质更集中地分布在靠近恒星的区域, 那么月球质量大小的胚胎可以更有效地吸积星子并形成类地行星, 甚至可形成具有6–8颗类地行星的多行星系统[44], 与TRAPPIST-1系统内的行星数量相当.

另一方面, 卵石与行星盘中气体具有较好的耦合性, 可在引力和气体阻力的共同作用下被行星胚胎吸积. 卵石吸积具有比星子吸积更大的吸积截面, 因而吸积效率更高[35, 53–54]. 在卵石吸积模型中, 行星可形成的最大固体质量受到卵石孤立质量(isolation mass, $M_{\rm iso}$)的限制, 大于该质量的行星可在其轨道周围形成一个较浅的环缝并阻

断卵石的径向迁移, 使行星和位于该行星内侧的行星胚胎均无法通过吸积卵石继续生长[55]. 卵石孤立质量与恒星质量($M_\star$)之间存在一定的幂律关系($M_{\rm iso} \propto M_\star^k, k \approx 1$)[56], 行星和寄主恒星质量分布见图4. 由此, 卵石吸积模型预言不同系统类地行星与其主星质量呈正比[57]. 受限于在红矮星周围较低的卵石孤立质量, 质量小于0.2 $M_\odot$的恒星周围最大可形成3倍地球质量的行星. 值得注意的是, 这类行星很难继续吸积大量气体而进一步成长为气态巨行星.

星子吸积和卵石吸积模型均可以解释小质量恒星周围类地行星的形成, 为了更深入地了解不同吸积模型对行星特性的影响, Coleman等[58]在1–5.5 au的原行星盘范围内放置了30个质量为0.1 $M_\oplus$的行星胚胎, 发现不论是通过吸积星子还是卵石的方式生长, 最终均可形成具有相似的平均质量、轨道偏心率、轨道倾角和周期比分布的行星族群. 唯一不同的是, 卵石中的水冰物质可能会在穿越行星大气包层向中心坠落的过程中被蒸发[59–61], 形成十分干燥的行星, 行星含水量或许为区分吸积生长模型提供了一种可能性. 但类地行星表面的海洋也可能是早期吸积的富氢原初大气与岩浆发生化学反应后的自然产物[62–63]. 行星的具体形成方式以及表面水的形成还有待未来更深入的研究.

2.3 系统动力学演化

行星在形成过程中除了吸积物质长大外, 后续还经历动力学演化. 迁移理论认为行星在距离恒星较远的位置形成, 并与气体盘发生角动量交换而向内迁移[64–65], 另一方面, 也有理论认为行星没有经历大规模迁移, 仅在目前观测位置形成, 称为原位形成模型[66–69].

根据原行星盘温度结构的不同, 迁移模型还可分为轨道内迁模型[70–72]和汇聚迁移模型(convergent migration)[73–76]. 行星在原行星盘内迁移主要是因为受到林德布拉德共振(Lindblad resonance)和共转共振(corotation resonance)力矩的作用, 迁移方向取决于总力矩的方向[77]. 在等温盘中, 行星轨道外侧的林德布拉德共振施加的力矩比内林德布拉德共振更强, 行星通常失去角动量并向内迁移. 而在非等温盘中, 原行星盘结构被分为由黏性加热主导的内盘和由恒星辐射加热为主导的外盘, 黏性盘中的行星可受到较强的共转力矩, 使行星迁移方向反转[78].

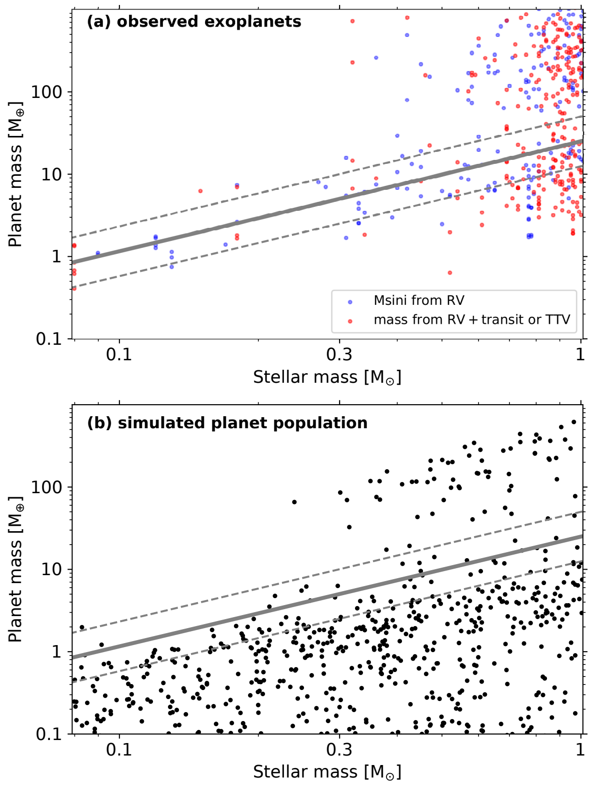

图 4 行星和寄主恒星质量分布图. 上图数据来源系外行星观测, 蓝点表示质量(下限)仅通过视向速度得出, 红点由TTV (Transit Timing Variation)或者视向速度结合掩星法得出行星真实质量; 下图黑点为Liu等[56]通过卵石吸积模型模拟得到的行星种群. 图中灰线为理论预言的卵石孤立质量. 在红矮星质量范围内形成的类地行星质量上限与主星质量成正比, 与观测有较好的吻合. 图引自Liu等[35].

Fig. 4 Planet and host star mass distribution map. Top panel: the blue dots are the planets only detected by RV surveys with a low mass limit, and the red dots are the planets with true masses either from combined RV and transit surveys, or from Transit Timing Variation (TTV) measurements. Bottom panel: the black dots show the planet population simulated by Liu et al.[56] through the pebble accretion model. The gray line is the theoretically predicted isolated mass of pebbles. The upper limit of the mass of terrestrial planets formed around M dwarfs is proportional to the host star, which is in good agreement with the observations. Figure adopted from Ref.[35].

Pan等[45]对比了这3种动力学演化模型，并研究了不同动力学演化模型对类地行星在原行星内盘形成的影响. 研究采用星子吸积模型，发现行星在原位模型中具有很低的吸积率，并且无法有效吸积雪线外的水冰物质，平均可形成7–8颗干燥的小质量类地行星. 轨道内迁模型中的行星可快速向盘内侧迁移并吸积星子，直至到达盘内边界停止，因此该模型中的行星通常有较高的含水量，但大多行星距离恒星不到0.01 au，很难在后期演化中保留水冰物质. 而汇聚迁移模型中的行星可在内盘区域反向迁移，不仅可以吸积雪线外富含水冰的物质，还可以在气体盘耗散后停留在宜居区附近，形成具有潜在宜居性的行星.

图5对比了不同行星动力学演化模型在行星质量、轨道半长径、偏心率以及轨道周期比等方面的分布特征. 图中阴影部分为观测统计结果，绿色点虚线、蓝色点线和橘黄色实线分别表示原位形成模型、轨道内迁模型和汇聚迁移模型(此处模拟结果未经过观测偏差修正). 模拟结果表明尽管未考虑行星大气的吸积，通过汇聚迁移模型形成的行星质量和轨道半长径均具有与观测相似的分布趋势，且在0.1 au附近存在峰值. 通过原位形成的行星轨道半长径则更倾向于是均匀分布的. 与原位模型和轨道内迁模型相比，汇聚迁移模型也可以更好地解释观测到的高偏心率行星的形成. 总体而言，汇聚迁移模型模拟形成的行星统计分布特征与观测具有更好的吻合度，迁移机制更有利于形成含水量较高的行星，也有利于解释轨道共振系统的形成.

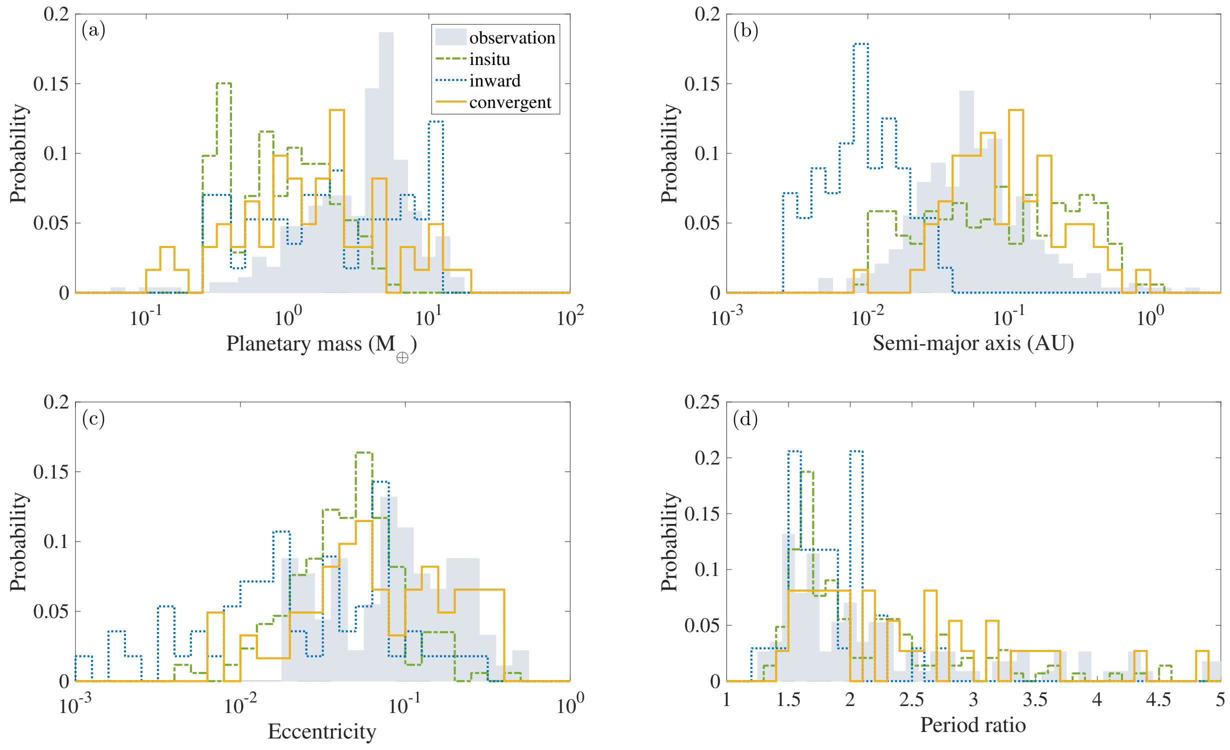

图 5　不同模型形成行星的质量、轨道半长径、偏心率以及轨道周期比分布与观测对比图. 图中阴影区域表示观测，绿色点虚线、蓝色点线和橘黄色实线分别代表原位形成模型、轨道内迁模型和汇聚迁移模型. 汇聚迁移模型总体上与观测统计有较好的吻合. 图引自Pan等[45].

Fig. 5　Comparison between the distributions of mass, semi-major axis, eccentricity, and period ratio of planets simulated in different models and observations. The shadows, green dash-dotted, blue doted and yellow solid lines represent the observations, insitu, inward migration and convergent migration scenarios, respectively. The convergent migration model has a better match with observations. Figure adopted from Ref.[45].

2.4 特征行星系统

在红矮星周围发现了多个行星系统, 其中Proxima Centauri和TRAPPIST-1行星系统一经发现便在学界内引起了广泛关注.

Proxima Centauri是距离地球约4.3光年、质量仅0.12 $M_\odot$的红矮星, 与类太阳恒星Alpha Centauri A和B构成了三星系统. 因为是距离地球最近的恒星, 又被亲切地称为比邻星. 通常三体系统很容易受到微小扰动而发生混沌现象, 仅在第三体的质量远小于其他两个天体, 或距离非常远时才可能维持动力学稳定, 这也使得此类系统构型中很难有其他天体存活, Proxima Centauri距离Alpha Centauri A和B约8700 au, 这为系外行星搜寻提供了可能, 2016年天文学家利用视向速度法在该恒星系统中发现了行星Proxima Centauri b[79]. 该行星的质量与地球相当, 距离恒星约0.05 au, 环绕比邻星以11 d的轨道周期运转, 恰好位于恒星的宜居带内, 这意味着Proxima Centauri b不仅是距离地球最近的系外行星, 表面还可能存在孕育生命的液态水[80]. 这一发现使该行星的形成、轨道稳定性及宜居性研究一跃成为当时最热门的课题. 对该行星系统展开了一系列观测, 发现在行星b轨道内侧可能还存在另一颗轨道周期仅约5 d, 质量不小于0.26 $M_\oplus$的行星[81], 外侧1.48 au处可能存在一颗最小质量为5.8 $M_\oplus$的超级地球[82], 仍需后续观测证实.

TRAPPIST-1行星系统是由TRAPPIST望远镜通过凌星法观测到的多行星系统, 由7颗质量和密度相似的类地行星构成, 环绕质量仅为0.09 $M_\odot$的超冷红矮星运行, 是目前已知含行星数量仅次于Kepler-90的多行星系统[83–85]. 该系统内的行星公转周期在1.5至18.8 d之间, 处于结构紧密的轨道共振结构, 其中有3颗行星的轨道位于宜居带内, 也是目前发现具有宜居带行星最多的系统. 该行星系统独一无二的分布特征和物理特性, 使其成为环红矮星行星系统形成研究及系外生命搜寻的重点研究对象之一.

为了解释该系统行星与行星之间紧密的轨道结构和共振链的形成, Ormel等[86]提出了雪线形成机制, 认为行星胚胎初始形成于雪线附近并向内迁移, 迁移过程中吸积雪线内干燥的卵石直至跨越气体盘内边缘进入无气体的空腔, 随后行星依次以同样的方式形成, 并在迁移过程中与前一颗行星产生共振. 行星后期大气损失也会使系统构型更加紧凑[87]. 行星b和c、c和d均越过了2:1一阶共振, 分别构成了8:5和5:3高阶共振, 这很可能是由于它们在演化早期便进入了空腔[88]. Schoonenberg等[89]和Ogihara等[90]针对该系统内行星的质量和质量分布特征分别作出了理论研究. 通过迁移形成的行星通常具有较高的含水量, 但观测表明TRAPPIST-1系统内行星的含水量不高于10wt%, 最内侧3颗行星的含水量几乎为零, 后期很可能经历了水蒸发过程[58].

2.5 行星宜居性

红矮星作为温度较低的主序星, 宜居带距离恒星更近, 具有搜寻宜居行星的天然优势, 目前观测到的大部分宜居行星均环绕红矮星运行[91].

但对这类行星的宜居性始终存在很大争议. 首先, 非常靠近主星的行星容易被恒星潮汐锁定, 使行星的一面始终朝向恒星而另一面背对恒星, 导致行星表面不同区域具有极大温度差. 永夜区域内的极寒温度还可能冻结大气主要成分, 阻碍行星表面的大气循环和生命生存[92–93]. 此外, 红矮星还具有较强的磁场活动、高能紫外和X射线辐射, 可持续蒸发行星表面的水冰物质并剥离行星表面大气[94]. 然而也有研究表明, 即使这类行星表面具有相对稀薄的大气层, 也可以驱使行星偏离与恒星的同步自转[95], 行星大气环流可随着自转周期的变化而呈现系统性的变化[96]. 在云反馈和大气环流的稳定作用下, 行星背阳面的大气也可被加热[97–98]. 大量氢原子可在大气光解离的过程中逃逸, 但与此同时也会发生其他化学过程形成次生大气, 如$CO + OH \rightarrow CO_2 + H$等, 因此红矮星周围行星的宜居性还取决于形成次生大气的能力[99].

生命起源的诸多原初过程都需要水分子的参与, 行星含水与否和含水量高低是宜居特性和生命起源的重要条件. 关于行星上水的来源, 一个主流的观点是来自于行星对含水冰卵石或星子的吸积. 行星形成位置对于其含水量尤为关键. 雪线以内的

水以气态水汽形式存在, 行星内核只有处于雪线以外才可能吸积水冰. 行星吸积水分含量受到行星迁移、气体盘温度演化等多方面因素影响[56, 86]. 行星系统的宏观结构也对其宜居性有着重要的影响. Clement等[100]指出, 在潜在的外侧海王星等大质量行星的扰动下, 雪线外侧小行星带天体可由散射进入宜居带内, 为行星提供水冰物质, 避免行星完全干燥. 另一个观点则认为行星吸积的原初大气可与岩浆发生一系列氧化还原反应并形成水. 研究表明, 行星胚胎质量达到0.2 $M_\oplus$即可吸积由氢气构成的原初大气, 即使地球的初始形成物质是完全干燥的, 原初大气中的氢气也足以与岩浆海洋中的氧相互作用产生大量的水[63]. 基于星子吸积的核吸积模型预测, 早期至中期的M型矮星周围约5%–10%的类地行星表面可形成适宜生命生存的海洋[62].

3 超级地球和亚海王星

通过凌星法、视向速度法以及引力透镜等多种手段发现, 超级地球和亚海王星是系外行星中非常普遍的行星种群[41]. 它们一般具有岩石或水冰组成的内核, 外层可能包裹以氢和氦为主要成分的大气. 一般而言, 半径介于1.25到2个地球半径(质量介于2到10个地球质量)的行星称为超级地球[101]; 半径介于2到4个地球半径(质量介于超级地球和海王星之间)的行星称为亚海王星[102–103].

3.1 超级地球和亚海王星观测

超级地球和亚海王星在红矮星周围的出现率相对比类地行星低. Dressing等[20]通过凌星法发现, 超级地球(1.5–2 $R_\oplus$)在M型矮星(0.1–0.6 $M_\odot$)周围50 d轨道周期以内的出现率约为46%, 轨道周期小于100 d的出现率为57%, 均略低于类地行星. 亚海王星的出现率更低, 约19%. 但视向速度法测得的超级地球平均数比凌星法略高, Tuomi等[104]结合UVES (Ultraviolet and Visual Echelle Spectrograph)和HADES (HArps-n red Dwarf Exoplanet Survey)对41颗M型矮星(0.1–0.8 $M_\odot$)的观测得出, 红矮星周围平均有1.02颗周期10–100 d的超级地球(行星质量下限$M_\mathrm{p}\sin i$ = 3–10 $M_\oplus$)[105–106]. 这与CARMENES的最新观测结论不同, Ribas等[8]总结了2016至2020年期间对362颗M型矮星(0.08–0.6 $M_\odot$)及其周围行星的观测发现, 超级地球的轨道周期在10–100 d内的平均数量为0.67, 在1–10 d和1–1000 d内的平均数分别为0.39和1.37.

含行星的恒星比例和行星系统的多样性都随恒星温度和质量的减小而逐渐增加. 约30%–35%类太阳恒星(恒星有效温度$T_\mathrm{eff} > 6500$ K)周围可通过Kepler望远镜观测到超级地球或亚海王星[107], 平均每个行星系统内有1.8颗[108–109]. 红矮星周围($T_\mathrm{eff} < 5000$ K)出现凌日行星的概率更高, 约75%红矮星周围可以发现行星, 每个行星系统内平均包含2.8颗行星[108].

3.2 短周期、高偏心率亚海王星

目前发现的亚海王星中有很多距离恒星非常近, 轨道半长径为0.01–0.03 au. 它们受到较强的恒星潮汐作用, 几乎在圆形轨道上运行. 但观测上也发现了少量高偏心率亚海王星, 如TOI-2406 b和K2-25 b均只有3 d左右的轨道周期, 偏心率却分别高达0.26[110]和0.43[111], 可能通过高偏心率迁移形成[112]. 不仅如此, TOI-2406 b的主星是质量极低的贫金属星([Fe/H] = −0.38, $M_\star = 0.162\ M_\odot$). 这类低质量贫金属星周围短周期亚海王星的形成以及高偏心率短周期行星的动力学演化都是学界关注的热点问题.

亚海王星并不一定孤独, 在部分亚海王星轨道附近还发现有其他行星的存在, 构成了一些比较有趣的系统构型[113]. 红矮星TOI-2096周围就存在一个由超级地球TOI-2096 b ($R_\mathrm{p} = 1.2\ R_\oplus$)和迷你海王星TOI-2096 c ($R_\mathrm{p} = 1.9\ R_\oplus$)构成的行星系统[114]. 根据系外行星统计研究[115–116], 行星半径分布分别在约1.3 $R_\oplus$和2.4 $R_\oplus$处存在两个峰值, 在1.5–1.8 $R_\oplus$间存在一个低谷. TOI-2096系统里的两颗行星则恰好处在半径谷(radius valley)的两侧, 且行星轨道周期比接近2:1轨道平运动共振. 若未来通过凌星计时变化(Transit Timing Variations, TTVs)或视向速度法对行星质量和密度给出进一步限定, 并利用James Webb空间望远镜对行星大气成分进行分析, 将对揭示行星半径谷的形成机制具有重要启示意义.

3.3 行星的半径谷

小质量系外行星($R_\mathrm{p} < 4\ R_\oplus$)的半径分布在观测统计上存在一个有趣的现象, 它们分别在1.3 $R_\oplus$和2.4 $R_\oplus$附近存在峰值, 而在1.5–2.0 $R_\oplus$范围内形成了一个低谷. 其中半径小于1.6 $R_\oplus$的行星(超级地球)密度较高, 被认为是与地球类似、主要由岩石构成的行星[101, 117]. 而半径大于1.6 $R_\oplus$的行星密度相对较低, 很可能存在大气包层, 或具有由水冰物质构成的行星核[102, 118–119].

超级地球和亚海王星之间的过渡半径与行星轨道周期和恒星特性等因素有关[120], 图6展示了过渡半径在轨道周期、恒星辐射、恒星质量和恒星金属丰度参数空间内的分布特性. 岩石类超级地球通常距离恒星更近, 远距离轨道上的行星更容易具有大气包层(图6(a)), 过渡半径与行星轨道周期之间存在幂律关系$R_\mathrm{p} \propto P^{-0.11}$[121]. 行星半径与恒星辐射也有关, 距离恒星越近、受到辐射作用越强的行星半径越小(图6(b)). Van Eylen等[122]发现过渡半径与轨道周期的幂律关系对环绕在红矮星(0.15–0.6 $M_\odot$)周围的行星同样适用, 但Cloutier等[123]却得到了与之相反的结论, 认为行星过渡半径随着恒星辐射(F)增强而减小($R_\mathrm{p} \propto F^{-0.06\pm0.025}$), 这主要归结于两者选择样本以及确定行星过渡半径采用的方法上的差异. 行星过渡半径随恒星质量减小而向小半径端移动, 但与恒星金属丰度之间没有显著的相关性(图6(c)和(d)). 如类太阳恒星周围行星半径谷的位置在1.8 $R_\oplus$附近, 早期M型恒星($\sim$0.5 $M_\odot$)周围行星的半径谷在1.5 $R_\oplus$附近. 而在更小质量的红矮星周围, 一些研究认为行星半径分布的峰谷结构将不再显著, 甚至可能消失[123].

对行星半径谷形成的理论解释主要可分为3类: 一类认为超级地球或亚海王星的形成主要取决于气体盘的质量, 超级地球形成于气体较为稀薄的盘中[124–125], 反之则形成亚海王星[126]. 这类模型预测超级地球和亚海王星之间的过渡半径与行星轨道周期正相关($R_\mathrm{p} \propto P^{0.11}$)[127], 与图6(a)的结论不符, 但与Cloutier等[123]给出的趋势一致. 该模型预测过渡半径随恒星质量增大的趋势($R_\mathrm{p} \propto M_\star^{0.14}$)与Petigura等[120]结论一致.

第2类模型指出, 行星在盘中均可吸积大量气体形成亚海王星, 但部分行星在后期演化过程中损失了大量或全部大气形成了超级地球[128–130]. 造成行星大气损失的机制有很多, 如恒星的高能紫外和X射线辐射[131–132]、行星形成过程中核驱动能量释放[133–136]等. 两种解释机制中的行星过渡半径和轨道周期均遵循与贫气体模型截然相反的规律, 但与Petigura等[120]和Van Eylen等[122]结果一致. 光致电离和核驱动模型的主要差异在于对小质量红矮星周围行星半径分布的预测. 红矮星具有比其他类型恒星更强烈的恒星活动和高能辐射, 且环绕它运行的行星都更靠近恒星, 受到高能辐射和光电离作用更加强烈, 行星大气也更容易被剥离. 核驱动模型对恒星辐射的依赖性较弱, 但会受到恒星光度演化的影响而使半径谷的宽度变窄[137].

第3类则认为行星半径的双峰分布是行星形成的必然结果[138]. 由于尘埃颗粒在雪线两侧具有不同的物质组分, 行星在形成演化过程中可吸积干燥或富含水冰物质的两类卵石, 最终可分别形成约3 $M_\oplus$的岩石类行星和质量约10 $M_\oplus$且具有冰核的较大质量行星, 从而解释行星观测中的双峰分布[139]. 亦或者是形成于雪线外的行星向内迁移, 在恒星辐射加热作用下发生失控温室效应, 引起行星半径的膨胀, 此时即使行星仅吸积了少量气体也可使半径膨胀超过2.3 $R_\oplus$, 因此半径谷两侧可能分别代表岩石类行星和富含水的行星[140]. Izidoro等[141]提出, 行星形成晚期的剧烈碰撞也会造成行星原始大气的损失, 可在1.8 $R_\oplus$附近形成半径谷, 但对于过渡半径和行星轨道周期之间的相关性仍有待进一步探索.

目前对红矮星周围行星半径谷位置以及过渡半径与行星轨道周期、恒星质量之间的幂律关系仍存在诸多不确定, 需要未来更多的观测作支撑. 不同理论机制对过渡半径和行星轨道周期、恒星质量相关性的预测不同, 根据这些差异性以及未来对超级地球和亚海王星更多的观测统计, 尤其是位于过渡半径附近行星及其物质组成、大气的观测, 可以更好地限定红矮星周围过渡半径的分布特性, 为行星半径谷的形成研究提供依据.

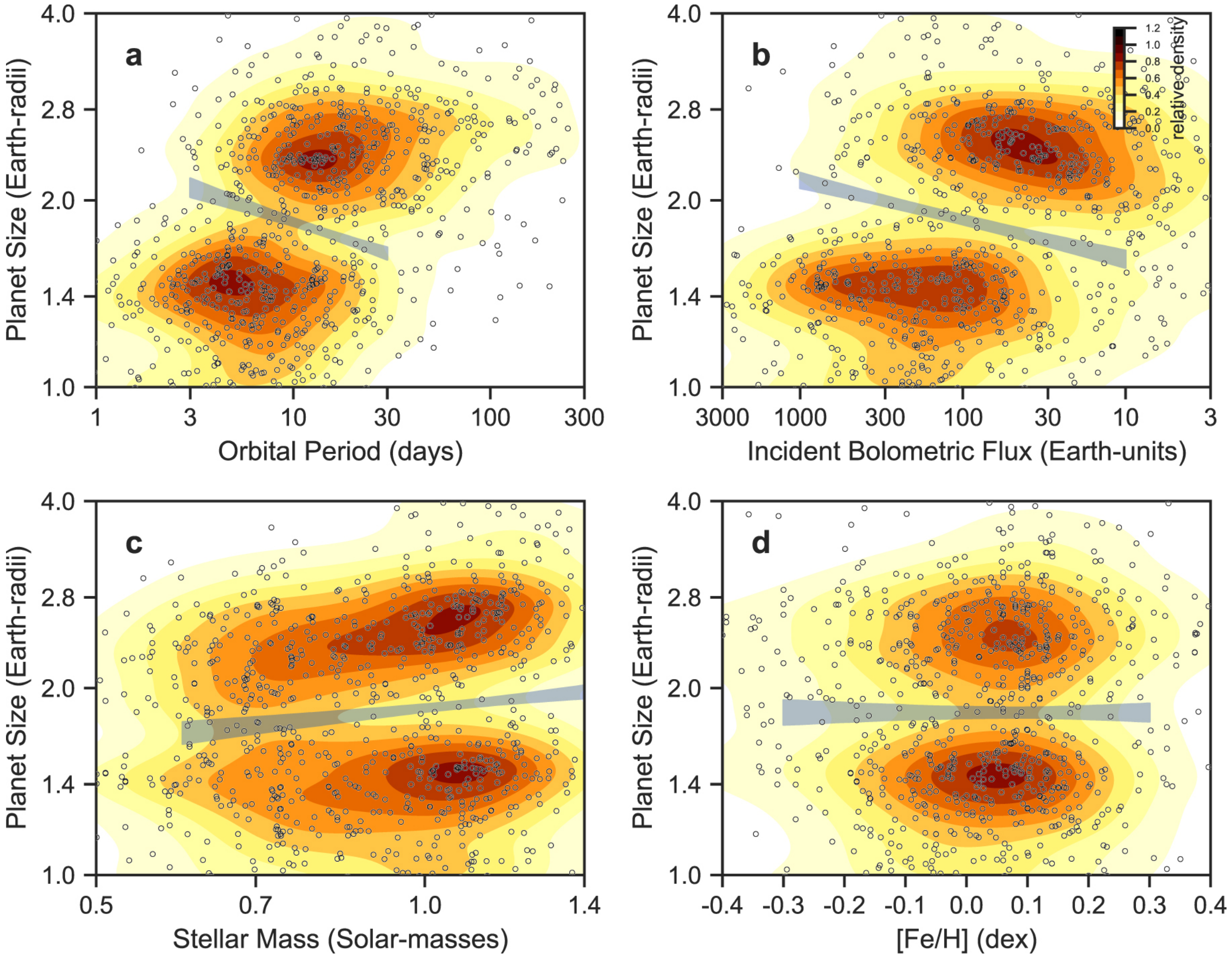

图 6 行星过渡半径在轨道周期、恒星辐射、恒星质量以及恒星金属丰度参数空间内的分布特征. 图中灰色条带为幂律拟合的行星半径谷, 等高线为行星数量密度的高斯核密度估计. 图引自Petigura等[120].

Fig. 6 Planet radius distribution as a function of planet period, stellar flux, stellar mass, and stellar metallicity, respectively. The grey bands are power-law fits of the radius gap. The contours show a Gaussian kernel density estimate of the number density of planets in this space. Figure adopted from Ref.[120].

4 气态巨行星

4.1 巨行星观测

目前在红矮星(0.08–0.3 $M_\odot$)周围观测到的巨行星(>30 $M_\oplus$)中, 仅不到十颗由凌星法和视向速度法发现[142], 其余主要由KMTNet (Korea Microlensing Telescope Network)[143]和OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment)[144]等引力透镜望远镜贡献.

根据TESS的观测, 早期M型恒星(0.45–0.65 $M_\odot$)周围出现热木星($7\ R_\oplus \leqslant R_{\rm p} \leqslant 2\ R_{\rm J}$, 轨道周期0.8–10 d)的概率仅为0.27%[22], 在小质量红矮星(0.088–0.26 $M_\odot$)周围的出现概率更低, 约为0.137%[23]. 而在类太阳恒星周围通过凌星法观测到热木星的概率范围为0.43%–0.71%, 是小质量红矮星的3–5倍[41, 145–151].

视向速度法在红矮星周围观测到热巨行星的数量有限, 只给出了热木星($m\sin i = 100$–$1000\ M_\oplus$)出现率的上限(< 1%)[105, 152]. 与之对应的类太阳恒星周围的热木星出现率为0.84%–1.5%[153–156]. 红矮星周围温暖巨行星(周期10–100 d)和冷巨行星

(轨道周期$<$ 3000 d)的出现率大约是2%[106, 152], 远比FGK型恒星周围冷巨星(轨道周期2–2000 d)的概率(10.5%)小[153].

与凌星法和视向速度法不同的是, 引力透镜更容易观测到距离恒星2–4 au $(M_\star/M_\odot)^{1/2}$的行星[157–158], 在小质量红矮星周围发现了较多距离恒星$\sim$ 1 au的气态巨行星[143, 159–160], 约占环红矮星行星总数量的20%.

巨行星是太阳系内除了类地行星以外最常见的行星. 然而学界对巨行星形成过程仍缺乏足够的认识, 尤其是小质量恒星周围巨行星的形成机制. 早期Andrews等[161]根据SMA亚毫米波射电望远镜阵对金牛座恒星形成区域的观测, 推断Class II恒星周围的原行星盘质量(M_d)与恒星质量普遍存在线性关系($M_\mathrm{d} \propto M_\star$), 约占主星质量的0.2%–0.6%. 如果气体盘与尘埃盘的质量比约为100:1, 小质量红矮星周围尘埃盘质量大约为0.5–6 $M_\oplus$. 后续阿塔卡马大型毫米波/亚毫米波阵列(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, ALMA)观测发现, 小质量恒星周围原行星盘质量随恒星质量的变化更显著, 盘和恒星质量之间为超线性关系($M_\mathrm{d} \propto M_\star^{1.3-1.9}$)[47], 显然不足以解释巨行星的形成. 且尘埃颗粒在环红矮星原行星盘内的径向漂移时标更短, 原行星盘以更快的速度耗散, 可进一步阻碍了气态巨行星的形成. 但不同年龄或恒星形成区内的尘埃盘质量可存在较大差异[162–163], 少数红矮星周围存在较大质量原行星盘, 为巨行星的形成提供了一种可能性[164]. 此外也不排除巨行星核在恒星处于Class 0/I阶段时已经形成的可能性.

4.2 巨行星形成理论

在核吸积模型中, 行星吸积时标和迁移时标是影响行星质量的两大重要因素. Burn等[44]提出仅当原行星盘质量足够大且行星迁移的速度被显著抑制的情况下, GJ 3512 b ($M_\mathrm{p} = 0.463\ M_\mathrm{J}$)这类气态巨行星才可能通过星子吸积形成. 而卵石吸积中行星固态核的生长受到孤立质量的限制. 尽管原行星盘外围的卵石孤立质量更大, 但卵石盘的标高和面密度更低, 行星吸积率很低. 因此行星胚胎在气体盘耗散时标内很难长到5–10个地球质量的行星核, 这也进一步阻碍了巨行星的形成[35, 56–57]. Morales等[165]将卵石吸积与星子吸积模型相结合, 假设初始气体盘物质的1%转换成了100 km大小的星子, 发现仅当恒星初始吸积率($3\times10^{-7}\ M_\odot\cdot\mathrm{yr}^{-1}$)接近类太阳恒星时才能形成巨行星. 同时因为行星迁移速度很快, 最终也只能形成距离恒星不到0.05 au的热木星. 而观测发现红矮星周围热木星的出现率仅约0.1%–0.27%, 大部分均距离恒星较远、具有较长的轨道周期, 这对核吸积模型提出了巨大的挑战.

目前卵石吸积研究均只关注单颗行星胚胎在盘内的生长, 而在几十至几百au的原行星盘内可形成多个行星胚胎, 这些胚胎可通过引力作用相互碰撞生长[166], 突破孤立质量的束缚, 进而吸积气体形成巨行星(Pan et al. in prep). 图7给出了一个通过此模型在质量为0.1 $M_\odot$的红矮星周围形成气态行星的案例. 图中彩色实线表示最终在系统内形成的行星, 灰色实线则表示在演化过程中被碰撞吸积或散射的行星胚胎. 虚线和点虚线分别表示黏性加热盘和辐射加热盘之间的过渡半径(左)和卵石孤立质量. 在该案例中, 初始20颗月球大小的胚胎在原行星盘内缓慢生长, 当部分行星胚胎的质量增长至可快速迁移时, 促使胚胎之间发生第1阶段的猛烈碰撞和生长, 剩余行星继续向内迁移并形成紧密的近共振链构型, 诱发第2次碰撞合并过程, 最终形成3颗质量$>$0.1 M_J的气态行星, 其中一颗质量甚至超过了100 $M_\oplus$, 距离恒星$\sim$ 0.2 au.

另一个解释巨行星形成的理论是引力不稳定模型. 原行星盘在引力不稳定作用下可形成螺旋密度波, 并沿径向向外转移角动量[167]. 当盘快速冷却且自引力不足以抵抗盘热压时将塌缩, 并在很短的时间内形成巨行星[168–170]. 这一过程通常发生在质量较大的气体盘外侧区域. 如在恒星质量为0.2 $M_\odot$、原行星盘尺寸为60 au的情况下, 原行星盘和恒星的质量比$q_\mathrm{disk} \approx 0.3$即可触发引力不稳定性并形成行星, 而在120 au的盘内则需要满足$q_\mathrm{disk} \approx 0.6$[39].

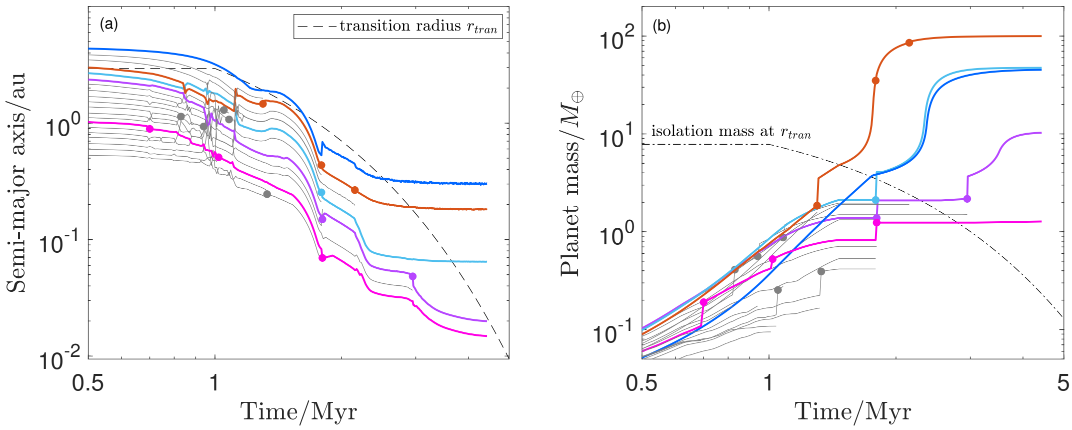

图 7 通过卵石吸积与胚胎相互引力作用解释小质量恒星(0.1 $M_\odot$)周围巨行星形成. 图中彩色实线表示系统内最终形成的行星, 灰色实线则表示在演化过程中被碰撞吸积或散射的行星胚胎. 圆点表示行星胚胎间的碰撞合并. 左图虚线表示过渡半径, 右图点虚线表示卵石孤立质量. 多个行星胚胎之间的碰撞吸积可促进大质量行星核的形成, 并在吸积大量气体后形成巨行星.

Fig. 7 The formation of giant planets around stars with mass of 0.1 $M_\odot$ by pebble accretion and gravitational interactions between planetary embryos. The colored and grey lines depict planets survived after long term evolution, and planetary embryos that are ejected or merged by collisions, respectively. The filled dots show the collisions and mergers between planetary embryos. The dashed line in the left panel indicates the transition radius. The dot-dashed line in the right panel represents the pebble isolation mass in disk. Collisions and mergers between planetary embryos promote the formation of a massive core, which can further grow through gas accretion and eventually become a giant planet.

5 总结与展望

红矮星是处于主序中低质量端的恒星, 具有较小的半径和较低的温度. 与此同时, 红矮星在银河系中广泛存在, 占恒星总数的一半以上. 研究红矮星周围行星系统的形成和演化既具有普适意义, 也为极端物理条件下的行星形成理论提供了有力的检验平台. 在探测早期, 这类恒星周围的行星因为主星亮度较低而难以发现. 直到近些年随着观测精度和方法的逐渐提升才发现了越来越多环红矮星行星. 它们不仅丰富了行星族群, 也为理解行星形成理论提供了更广阔的视角.

根据现有观测统计, 平均每颗红矮星周围至少存在一颗类地行星, 比FGK型恒星周围类地行星的出现率更高. 这些类地行星在轨道分布上具有明显的分布特征, 距离恒星非常近, 多行星系统轨道结构十分紧密, 部分具有共振链构型. 目前已提出了多种可解释类似构型形成的理论模型, 包括星子和卵石吸积、原位形成、轨道内迁和汇聚迁移等模型. 不同模型形成的行星及行星系统在质量分布、共振类型、行星含水量等方面存在些许差异, 但针对某一特定系统的具体形成方式仍然不清晰, 需要未来在观测上对行星物质组成、大气成分等给出进一步的限制. 类地行星的宜居性是行星科学中永恒的话题, 红矮星独特的物理特性使其成为目前具有宜居带行星最多的主星. 但这些行星实际是否宜居还存在诸多争议, 同样需要对行星含水量、是否潮汐锁定及是否存在大气等问题进行观测确认.

超级地球和亚海王星的半径在观测统计上具有双峰-谷结构, 目前也发展了多种理论机制对这一特征的形成给予解释和预测. 尽管不同模型认为过渡半径和行星轨道周期、恒星辐射以及恒星质量等物理特性之间具有完全相反或较大差异的变化趋势, 但由于目前红矮星周围这两类行星的观测样本还不足以确定过渡半径的分布特征, 无法通过理论与观测的对比确定行星半径谷的形成机制. 期待未来可以通过观测更多位于过渡半径附近的行星, 或通过James Webb等望远镜进一步确定行星物质组分等方式, 研究行星半径双峰分布的形成.

红矮星周围巨行星的出现率远低于类太阳恒星, 尤其热木星具有极低的出现率. 但近几年通过引力透镜法发现了很多距离恒星1 au左右的气态

行星, 对行星形成理论提出了巨大的挑战. 观测认为红矮星周围的巨行星更倾向于在距离恒星较远的轨道上, 这或许为行星迁移模型提供了有利证据. 无论是核吸积模型还是引力不稳定性模型, 小质量恒星周围气态巨行星的形成均对原行星盘质量提出了较高要求, 与原行星盘观测统计结果存在很大差异. 若结合James Webb空间望远镜对行星大气成分的观测, 或许可以限制行星的初始形成位置并帮助反演行星的形成与演化过程.

参考文献

[1] Mayor M, Queloz D. Nature, 1995, 378: 355
[2] West A A, Hawley S L, Bochanski J J, et al. AJ, 2008, 135: 785
[3] Marcy G W, Butler R P, Vogt S S, et al. ApJ, 1998, 505: L147
[4] Salpeter E E. ApJ, 1955, 121: 161
[5] Henry T J, Jao W C, Winters J G, et al. AJ, 2018, 155: 265
[6] Reylé C, Jardine K, Fouqué P, et al. A&A, 2021, 650: A201
[7] Mulders G D, Pascucci I, Apai D. ApJ, 2015, 814: 130
[8] Ribas I, Reiners A, Zechmeister M, et al. A&A, 2023, 670: A139
[9] Madhusudhan N, Piette A A A, Constantinou S. ApJ, 2021, 918: 1
[10] Lustig-Yaeger J, Fu G, May E M, et al. 2023, arXiv:2301.04191
[11] Sullivan P W, Winn J N, Berta-Thompson Z K, et al. ApJ, 2015, 809: 77
[12] Barclay T, Pepper J, Quintana E V. ApJS, 2018, 239: 2
[13] Irwin J, Charbonneau D, Nutzman P, et al. Transiting Planets, 2009, 253: 37
[14] Irwin J M, Berta-Thompson Z K, Charbonneau D, et al. 18th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun, 2015, 18: 767
[15] Jehin E, Gillon M, Queloz D, et al. The Messenger, 2011, 145: 2
[16] Sebastian D, Gillon M, Ducrot E, et al. A&A, 2021, 645: A100
[17] Gibbs A, Bixel A, Rackham B V, et al. AJ, 2020, 159: 169
[18] Kotani T, Tamura M, Suto H, et al. Proceedings of the SPIE, 2014, 9147: 914714
[19] Quirrenbach A, CARMENES Consortium, Amado P J, et al. Proceedings of the SPIE, 2020, 11447: 114473C
[20] Dressing C D, Charbonneau D. ApJ, 2015, 807: 45
[21] 潘梦睿, 季江徽, 王素. 天文学报, 2021, 62: 38
[22] Gan T, Wang S X, Wang S, et al. AJ, 2023, 165: 17
[23] Bryant E M, Bayliss D, Van Eylen V. MNRAS, 2023, 521: 3663
[24] Wang S, Ji J. ApJ, 2014, 795: 85
[25] Gillon M, Triaud A H M J, Demory B O, et al. Nature, 2017, 542: 456
[26] Kipping D, Nesvorný D, Hartman J, et al. MNRAS, 2019, 486: 4980
[27] 黄秀敏, 季江徽, 董瑶. 天文学报, 2020, 61: 54
[28] Wang S, Ji J. AJ, 2017, 154: 236
[29] Wang S, Lin D N C, Zheng X, et al. AJ, 2021, 161: 77
[30] Pan M, Wang S, Ji J. MNRAS, 2020, 496: 4688
[31] Lopez-Santiago J, Martino L, Míguez J, et al. AJ, 2020, 160: 273
[32] Zang W, Han C, Kondo I, et al. RAA, 2021, 21: 239
[33] Jiang C F, Xie J W, Zhou J L. AJ, 2020, 160: 180
[34] Turrini D. 2023, arXiv:2302.08317
[35] Liu B, Ji J. RAA, 2020, 20: 164
[36] Dodson-Robinson S E, Veras D, Ford E B, et al. ApJ, 2009, 707: 79
[37] Boss A P. ApJ, 2011, 731: 74
[38] Backus I, Quinn T. MNRAS, 2016, 463: 2480
[39] Mercer A, Stamatellos D. A&A, 2020, 633: A116
[40] Dressing C D, Charbonneau D. ApJ, 2013, 767: 95
[41] Fressin F, Torres G, Charbonneau D, et al. ApJ, 2013, 766: 81
[42] Ment K, Charbonneau D. 2023, arXiv:2302.04242
[43] Miguel Y, Cridland A, Ormel C W, et al. MNRAS, 2020, 491: 1998
[44] Burn R, Schlecker M, Mordasini C, et al. A&A, 2021, 656: A72
[45] Pan M, Wang S, Ji J. MNRAS, 2022, 510: 4134
[46] Adams F C, Hollenbach D, Laughlin G, et al. ApJ, 2004, 611: 360
[47] Pascucci I, Testi L, Herczeg G J, et al. ApJ, 2016, 831: 125
[48] Cresswell P, Nelson R P. A&A, 2008, 482: 677
[49] Mulders G D, Drążkowska J, van der Marel N, et al. ApJL, 2021, 920: L1
[50] Kokubo E, Ida S. Icarus, 1998, 131: 171
[51] Ida S, Lin D N C. ApJ, 2004, 604: 388
[52] Coleman G A L, Nelson R P. MNRAS, 2014, 445: 479
[53] Ormel C W, Klahr H H. A&A, 2010, 520: A43
[54] Lambrechts M, Johansen A. A&A, 2012, 544: A32
[55] Lambrechts M, Johansen A, Morbidelli A. A&A, 2014, 572: A35
[56] Liu B, Lambrechts M, Johansen A, et al. A&A, 2019, 632: A7
[57] Liu B, Lambrechts M, Johansen A, et al. A&A, 2020, 638: A88

[58] Coleman G A L, Leleu A, Alibert Y, et al. A&A, 2019, 631: A7

[59] Ormel C W, Shi J M, Kuiper R. MNRAS, 2015, 447: 3512

[60] Cimerman N P, Kuiper R, Ormel C W. MNRAS, 2017, 471: 4662

[61] Béthune W, Rafikov R R. MNRAS, 2019, 488: 2365

[62] Kimura T, Ikoma M. NatAs, 2022, 6: 1296

[63] Young E D, Shahar A, Schlichting H E. Nature, 2023, 616: 306

[64] Lin D N C, Papaloizou J. ApJ, 1986, 309: 846

[65] Lin D N C, Bodenheimer P, Richardson D C. Nature, 1996, 380: 606

[66] Hansen B M S, Murray N. ApJ, 2012, 751: 158

[67] Chiang E, Laughlin G. MNRAS, 2013, 431: 3444

[68] Chatterjee S, Tan J C. ApJ, 2014, 780: 53

[69] Ogihara M, Morbidelli A, Guillot T. A&A, 2015, 578: A36

[70] Ogihara M, Ida S. ApJ, 2009, 699: 824

[71] Unterborn C T, Desch S J, Hinkel N R, et al. NatAs, 2018, 2: 297

[72] Raymond S N, Boulet T, Izidoro A, et al. MNRAS: Lett, 2018, 479: L81

[73] Garaud P, Lin D N C. ApJ, 2007, 654: 606

[74] Pierens A, Raymond S N. A&A, 2011, 533: A131

[75] Liu B, Zhang X, Lin D N C, et al. ApJ, 2014, 798: 62

[76] Liu B, Zhang X, Lin D N C. ApJ, 2016, 823: 162

[77] Paardekooper S J, Baruteau C, Kley W. MNRAS, 2011, 410: 293

[78] Kretke K A, Lin D N C. ApJ, 2012, 755: 74

[79] Anglada-Escudé G, Amado P J, Barnes J, et al. Nature, 2016, 536: 437

[80] Ribas I, Bolmont E, Selsis F, et al. A&A, 2016, 596: A111

[81] Faria J P, Suárez Mascareño A, Figueira P, et al. A&A, 2022, 658: A115

[82] Damasso M, Del Sordo F, Anglada-Escudé G, et al. SciA, 2020, 6: eaax7467

[83] Cabrera J, Csizmadia S, Lehmann H, et al. ApJ, 2013, 781: 18

[84] Gillon M, Jehin E, Lederer S M, et al. Nature, 2016, 533: 221

[85] Shallue C J, Vanderburg A. AJ, 2018, 155: 94

[86] Ormel C W, Liu B, Schoonenberg D. A&A, 2017, 604: A1

[87] Wang S, Lin D N C. AJ, 2023, 165: 174

[88] Huang S, Ormel C W. MNRAS, 2022, 511: 3814

[89] Schoonenberg D, Liu B, Ormel C W, et al. A&A, 2019, 627: 15

[90] Ogihara M, Kokubo E, Nakano R, et al. A&A, 2022, 658: A184

[91] Kossakowski D, Kürster M, Trifonov T, et al. A&A, 2023, 670: A84

[92] Selsis F, Kasting J F, Levrard B, et al. A&A, 2007, 476: 1373

[93] Shields A L, Ballard S, Johnson J A. PhR, 2016, 663: 1

[94] Tian F, Ida S. NatGe, 2015, 8: 177

[95] Leconte J, Wu H, Menou K, et al. Science, 2015, 347: 632

[96] Edson A, Lee S, Bannon P, et al. Icarus, 2011, 212: 1

[97] Joshi M. Astrobiology, 2003, 3: 415

[98] Pierrehumbert R T. ApJL, 2011, 726: L8

[99] Kral Q, Wyatt M C, Triaud A H M J, et al. MNRAS, 2018, 479: 2649

[100] Clement M S, Quintana E V, Quarles B L. ApJ, 2022, 928: 91

[101] Marcy G W, Isaacson H, Howard A W, et al. ApJS, 2014, 210: 20

[102] Lopez E D, Fortney J J. ApJ, 2014, 792: 1

[103] Jontof-Hutter D, Ford E B, Rowe J F, et al. ApJ, 2016, 820: 39

[104] Tuomi M, Jones H R A, Barnes J R, et al. MNRAS, 2014, 441: 1545

[105] Sabotta S, Schlecker M, Chaturvedi P, et al. A&A, 2021, 653: A114

[106] Pinamonti M, Sozzetti A, Maldonado J, et al. A&A, 2022, 664: A65

[107] Zhu W, Petrovich C, Wu Y, et al. ApJ, 2018, 860: 101

[108] Yang J Y, Xie J W, Zhou J L. AJ, 2020, 159: 164

[109] 张青欣, 暴春晖, 季江徽. 天文学报, 2023, 64: 12

[110] Wells R D, Rackham B V, Schanche N, et al. A&A, 2021, 653: A97

[111] Stefansson G, Mahadevan S, Maney M, et al. AJ, 2020, 160: 192

[112] Huang X M, Ji J H. AJ, 2022, 164: 177

[113] Rowe J F, Bryson S T, Marcy G W, et al. ApJ, 2014, 784: 45

[114] Pozuelos F J, Timmermans M, Rackham B V, et al. A&A, 2023, 672: A70

[115] Fulton B J, Petigura E A, Howard A W, et al. AJ, 2017, 154: 109

[116] Fulton B J, Petigura E A. AJ, 2018, 156: 264

[117] Dressing C D, Charbonneau D, Dumusque X, et al. ApJ, 2015, 800: 135

[118] Rogers L A. ApJ, 2015, 801: 41

[119] Jontof-Hutter D, Ford E B, Rowe J F, et al. ApJ, 2016, 820: 39

[120] Petigura E A, Rogers J G, Isaacson H, et al. AJ, 2022, 163: 179

[121] Martinez C F, Cunha K, Ghezzi L, et al. ApJ, 2019, 875: 29

[122] Van Eylen V, Astudillo-Defru N, Bonfils X, et al. MNRAS, 2021, 507: 2154

[123] Cloutier R, Menou K. AJ, 2020, 159: 211

[124] Lopez E D, Rice K. MNRAS, 2018, 479: 5303

[125] Lee E J, Connors N J. ApJ, 2021, 908: 32

[126] Zeng L, Jacobsen S B, Sasselov D D, et al. PNAS, 2019, 116: 9723

[127] Luque R, Serrano L M, Molaverdikhani K, et al. A&A, 2021, 645: A41

[128] Owen J E, Wu Y Q. ApJ, 2013, 775: 105

[129] Lopez E D, Fortney J J. ApJ, 2013, 776: 2

[130] Jin S, Mordasini C, Parmentier V, et al. ApJ, 2014, 795: 65

[131] Owen J E, Wu Y Q. ApJ, 2017, 847: 29

[132] Jin S, Mordasini C. ApJ, 2018, 853: 163

[133] Ginzburg S, Schlichting H E, Sari R. MNRAS, 2018, 476: 759

[134] Gupta A, Schlichting H E. MNRAS, 2019, 487: 24

[135] Gupta A, Schlichting H E. MNRAS, 2021, 504: 4634

[136] Gupta A, Nicholson L, Schlichting H E. MNRAS, 2022, 516: 4585

[137] Gupta A, Schlichting H E. MNRAS, 2020, 493: 792

[138] Chen Y X, Li Y P, Li H, et al. ApJ, 2020, 896: 135

[139] Venturini J, Guilera O M, Haldemann J, et al. A&A, 2020, 643: L1

[140] Luque R, Pallé E. Science, 2022, 377: 1211

[141] Izidoro A, Schlichting H E, Isella A, et al. ApJL, 2022, 939: L19

[142] Schlecker M, Burn R, Sabotta S, et al. A&A, 2022, 664: A180

[143] Zang W C, Yang H J, Han C, et al. MNRAS, 2022, 515: 928

[144] Udalski A, Paczynski B, Zebrun K, et al. Acta Astronomica, 2002, 52: 1

[145] Howard A W, Marcy G W, Bryson S T, et al. ApJS, 2012, 201: 15

[146] Masuda K, Winn J N. AJ, 2017, 153: 187

[147] Petigura E A, Marcy G W, Winn J N, et al. AJ, 2018, 155: 89

[148] Zhou G, Huang C X, Bakos G Á, et al. AJ, 2019, 158: 141

[149] Beleznay M, Kunimoto M. MNRAS, 2022, 516: 75

[150] Zhu W, Dong S. ARA&A, 2021, 59: 291

[151] Li D, Mustill A J, Davies M B, et al. MNRAS, 2022, 518: 4265

[152] Bonfils X, Delfosse X, Udry S, et al. A&A, 2013, 549: A109

[153] Cumming A, Butler R P, Marcy G W, et al. PASP, 2008, 120: 531

[154] Mayor M, Marmier M, Lovis C, et al. 2011, arXiv:1109.2497

[155] Wright J T, Marcy G W, Howard A W, et al. ApJ, 2012, 753: 160

[156] Wittenmyer R A, Wang S, Horner J, et al. MNRAS, 2020, 492: 377

[157] Gaudi B S. ARA&A, 2012, 50: 411

[158] Penny M T, Scott Gaudi B, Kerins E, et al. ApJS, 2019, 241: 3

[159] Han C, Bennett D P, Udalski A, et al. AJ, 2019, 158: 114

[160] Zhang X Y, Zang W C, Udalski A, et al. AJ, 2020, 159: 116

[161] Andrews S M, Rosenfeld K A, Kraus A L, et al. ApJ, 2013, 771: 129

[162] Rilinger A M, Espaillat C C. ApJ, 2021, 921: 182

[163] Manara C F, Ansdell M, Rosotti G P, et al. 2022, arXiv:2203.09930

[164] Ward-Duong K, Patience J, Bulger J, et al. AJ, 2018, 155: 54

[165] Morales J C, Mustill A J, Ribas I, et al. Science, 2019, 365: 1441

[166] Wimarsson J, Liu B, Ogihara M. MNRAS, 2020, 496: 3314

[167] Gammie C F. ApJ, 2001, 553: 174

[168] Johnson B M, Gammie C F. ApJ, 2003, 597: 131

[169] Rice W K M, Armitage P J, Bonnell I A, et al. MNRAS, 2003, 346: L36

[170] Rice W K M, Lodato G, Armitage P J. MNRAS: Lett, 2005, 364: L56

A Review to the Observational and Theoretical Studies of Planetary Systems around Red Dwarfs

PAN Meng-rui LIU Bei-bei
(Institute for Astronomy, School of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract Red dwarfs are one of the smallest and dimmest main-sequence stars. With the improvement of observation technology, a rich population of planets have been discovered around them, which exhibits distinct distribution characteristics from planets around Solar-like stars. Earth-like planets have a higher occurrence rate around red dwarfs, and the planetary systems are tightly compact. The closer habitable zone makes it easier to search for habitable planets. The distribution of the radius valley between super-Earths and sub-Neptunes also differs from that around solar-like stars. Moreover, the discovery of giant planets around these low-mass stars can be hard to explain by current leading theories of planet formation. As the mass of solid material in the protoplanetary disk decreases with decreasing stellar masses, the formation of giant planets remains challenging. The observations from telescopes such as Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS), James Webb, and Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), have provided invaluable insights and opportunities for the study of planetary formation. In this paper, we review the observations of different populations of planets and summarize the up-to-date understanding of planetary formation around red dwarfs.

Key words planets and satellites: formation, planets and satellites: terrestrial planets, planets and satellites: gaseous planets, stars: low-mass